

至適運動強度の指標になる二重積屈曲点法に収縮期の血圧変化が及ぼす影響

(運動負荷試験 / 収縮期血圧 / 二重積)

矢倉千昭*・木原勇夫**

Effect of Systolic Blood Pressure on Double-product Break-point Value as an Index of Optimum Exercise Strength

(incremental exercise test / systolic blood pressure / double product)

Chiaki YAGURA*, Isao KIHARA**

The anaerobic threshold value or lactate threshold value, which provides a good index of optimum exercise strength, can be estimated from the curve of double-product break-points (DPBPs) measured during bicycle ramp loading exercise. In order to elucidate the effect of systolic blood pressure (SBP) on the DPBP response, bicycle ramp loading exercises were conducted by 14 student volunteers (10 males and 4 females). Third regression curves with two conversion points corresponding to low and high SBP were detected in the male subjects. By contrast, the SBP regression curves of female subjects exhibited no such clear conversion points. Third regression curves were also obtained from the double-product values measured during ramp loading exercises in both sexes, and the ascending curves tended to be depressed near the end of the exercise. The patterns of the DPBP response, however, essentially were unaffected by the various SBP values resulting from the change in exercise intensity.

至適運動強度の指標になる無酸素性作業閾値 (anaerobic threshold : AT) および乳酸性作業閾値 (lactate threshold : LT) を簡便に測定する方法として二重積屈曲点 (double product break point: DPBP) 法がある。この二重積屈曲点の測定に収縮期の血圧 (systolic blood pressure: SBP) 変化が及ぼす影響を明らかにするために、14名の学生 (男性10名, 女性4名) を被験者とし、ランプ負荷によるペダリング運動を実施した。男性のSBPは低圧と高圧に2つの変異点がみられる3次回帰式となったが、女性には明らかな変異点はみられなかった。二重積 (double product: DP) は男女とも3次回帰式となり、運動終了前に上昇抑制傾向がみられた。これらの結果から、運動強度の変化に伴うSBPの変化は、DPBPパターンに影響することは少ないことが示された。

I はじめに

呼気ガス分析による無酸素性作業閾値 (anaerobic threshold ; AT) や乳酸測定による乳酸性作業閾値 (lactate threshold ; LT) は、中高年齢者の健康増進をはじめ高血圧症や虚血性心疾患等に対する至適運動強度の指標として有用性が広く知られている。しかし、これら方法は高価な呼気ガス分析器の使用や頻回に血液を採取する必要があり、誰もが安価で簡単に行うことが難しく、利用が一般化するまでには至っていない。

AT, LTを簡便に測定する方法として、田中ら¹⁾²⁾は二重積屈曲点 (double product break point ; DPBP) 法を開発している。DPBPの検出は、基本的に漸増する運動負荷試験中の心拍数 (HR) と収縮期血圧 (SBP) を記録し、独立変数 (X軸) を経過時間や運動強度 (Watt), 従属変数 (Y軸) を二重積 (DP = HR × SBP) とし、その運動中にDPが急に上昇する2つの回帰直線の交点から求める。しかし、小原ら³⁾は多段階運動負荷試験におけるHRとSBPとの関係について、SBPにはHRの低い時点での急激な上昇とHRの高い時点でその上昇が抑制される傾向があり、DPにおいてはHRの増加と共に上昇する傾向を示すが、一部の被験者にSBPと同様の抑制傾向が見られることを報告している。もしそうであれば、DPBP検出に少なからず影響を与え

*理学療法学科, 島根リハビリテーション学院

Department of Physical Therapy, Shimane Rehabilitation College

**健康スポーツ科学教室

Department of Health and Sports Science

ることが推測される。

本研究では、漸増する運動負荷試験におけるHRとSBP、その積であるDPの応答変化について調べ、これらの応答変化がDPBP検出に与える影響について検討した。

II 被験者

被験者は、本研究の主旨を理解した上で同意を得た健康な学生14名（男性10名、女性4名）であった。被験者の年齢、身長、体重およびBody Mass Index (BMI)の平均値と標準偏差は、それぞれ 21.3 ± 3.1 歳、 1.7 ± 0.1 m、 60.4 ± 9.5 kg、 21.7 ± 2.4 であった。また安静時におけるSBP、HR、DPの平均値と標準偏差は、それぞれ 113.0 ± 9.5 mmHg、 78.1 ± 10.0 bpm、 8830 ± 1343 であった。これらの被験者について、運動時のSBP、HR、分時酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) および他の呼気ガスパラメータを測定した。なお、被験者には測定前夜から飲酒と喫煙を禁止し、測定開始予定の最低2時間前には食事を終えるように指示した。

III 方法

運動負荷試験は、電気制動式自転車エルゴメータ (Lode社製Lehcor500) によるペダリング運動で実施した。プロトコールは安静座位を5分間とり、3分間0 Wattでウォーミングアップを行わせ、引き続き男性1分間20 Watt、女性1分間10 Wattのランプ負荷を課した。自転車エルゴメータの駆動回転数は50 rpmとし、この回転数が保てなくなった時点を終了とした。

負荷時のSBP、HRは非観血運動負荷血圧監視装置 (Sun Tech社製Tango) で1分ごとに記録し、そのSBPとHRの積をDPとした。Tangoは、コロトコフ音と心電信号を同期化してノイズ信号や体動による雑音を分離するR-wave gating法と3次元コロトコフ音解析により、エルゴメータなどの動きの激しい環境において確実な血圧測定が可能となっている。実際、再測定などやり直しをするような明らかな測定エラーは一度もなかった。呼気ガス代謝の測定は、呼気ガス分析器 (Sensor Medics社製Vmax29c) でBreath by Breathにて連続的に測定した。

HRとSBP、DP、負荷強度とHR、SBP、DPの関係については、全被験者および男女において最小自乗法により回帰式を求めた。DPBPは、負荷強度 (X軸)、DP (Y軸) とし、2本の回帰直線で形成される折線の残差分散を求め、残差が最小となる2本の直線の交点として決定した。DPBP時の $\dot{V}O_2$ は呼気ガス分析器で記録

した $\dot{V}O_2$ のDPBPの前後9呼吸数を移動平均したものをを用いた。ATの判定は、分時二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) の $\dot{V}O_2$ に対する上昇点 (V-slope法) としてグラフから決定した。

IV 結果

1. HRに対するSBPの上昇パターン

HRとSBPの関係においてSBPは低圧と高圧の2点で変異点を持つと仮定し、その条件にあう3次回帰式で求めた。全被験者14名の安静とウォーミングアップ時のデータを除く全データでは、相関係数は0.74であり、危険率1%以内の有意な相関がみられた。回帰曲線はHR70 bpmでSBPが上昇しはじめ、180 bpmでその上昇率がゼロとなる傾向を示した (図1)。男女に分けてみると、男性はHR65 bpmでSBPの上昇がはじまり、175 bpmでその上昇率がゼロとなった。女性はHRの頭打ちのない上昇を続ける回帰式となり、全体的にSBPは男性より低い傾向を示した。また、被験者ごとに3次回帰式の適用を検討したが、いずれも危険率1%以内の有意な相関がみられた。HRの高いところで明らかな上昇抑制がみられたのは8名、うち女性は2名であった。

2. 運動強度 (Watt) に対するHRとSBPの上昇パターン

漸増する運動強度に対してHRは前半が指数関数的、後半が直線的に上昇するので、HRは2次、SBPは3次の回帰式で求めた。なお、男性と女性の負荷設定が違いため、ここでは男女に分けて特徴をみた。男性のHR、SBPの相関係数はそれぞれ0.93、0.87、女性は0.97、0.92であり、いずれも危険率1%以内の有意な相関がみられた (図2)。HRでは、男性はXの2次の項が正となるが、女性は負となった。SBPでは男性は25 Wattで上昇がはじまり、180 Wattでその上昇率がゼロとなったが、女性は0 Wattから上昇し、150 Wattでその上昇率がゼロとなった。被験者ごとにみると、HRでXの2次の項が負となったのは2名の女性だけで、SBPで明らかな上昇抑制がみられたのは7名、うち女性は2名であった。

3. 運動強度 (Watt) に対するDPの上昇パターン、DPBPとATとの関係

DPにも2つの変異点が存在すると仮定し、3次回帰式で求めた。男性女性ともに低い運動強度でDPが急に上昇しはじめ、負荷試験終盤に上昇抑制傾向がみられる回帰式となった (図3)。男性の相関係数は0.94、女性は0.97で、いずれも危険率1%以内であった。被験者ごとにみると、DPに明らかな上昇抑制がみられたのは4名、うち女性は2名であった。

運動負荷中の全てのデータから求めた二重積屈曲点 (DPBP(A)) のDP, Watt, $\dot{V}O_2$ の平均値と標準偏差は, 13106 ± 2312 , 59.7 ± 24.9 Watt, 15.0 ± 3.6 mL/min/kgであった。V-slope法によるATは 16.1 ± 2.4 mL/min/kgで, DPBP(A)との相関係数は $r=0.78$, $p<0.001$ であった。DPに上昇抑制がみられた4名において抑制データを除いて求めた二重積屈曲点 (DPBP(S)) を用いた場合のDP, Watt, $\dot{V}O_2$ の平均値と標準偏差は, 13442 ± 2158 , 63.6 ± 22.3 Watt, 15.4 ± 3.3 mL/min/kgで, ATとの相関係数は $r=0.80$, $p<0.001$ であった (図4)。4名だけのATとDPBP(A)とDPBP(S)で比較してみると, Wilcoxon検定で危険率5%での有意差はみられなかったが, DPBP(A)とDPBP(S)の $\dot{V}O_2$ はともにATより低くなり, 特にDPBP(A)にその傾向がみられた。

V 考 察

SBPは軽強度では上昇率が小さく, 強度がある程度まで高まってから上昇傾向が現れ⁴⁾, さらに血圧が過度に上昇すると圧受容器の興奮が高まり交感神経活動を抑制することが知られている⁵⁾。このことから考えると, 運動強度が高い状態では血圧の上昇傾向は抑制されることになる。SBPはHR, 運動強度に対して2つの変異点を持つと仮定し, 3次回帰式での妥当性を検討した結果, 非常に高い有意な相関がみられた。

男性の3次回帰式におけるSBP第一, 第二変異点のHRは, 65 bpmと175 bpmであった。HRとSBPの関係に個人差があるが, 上昇抑制がみられた男性6名は, 130から180 bpmの間で上昇抑制傾向がみられた。また,

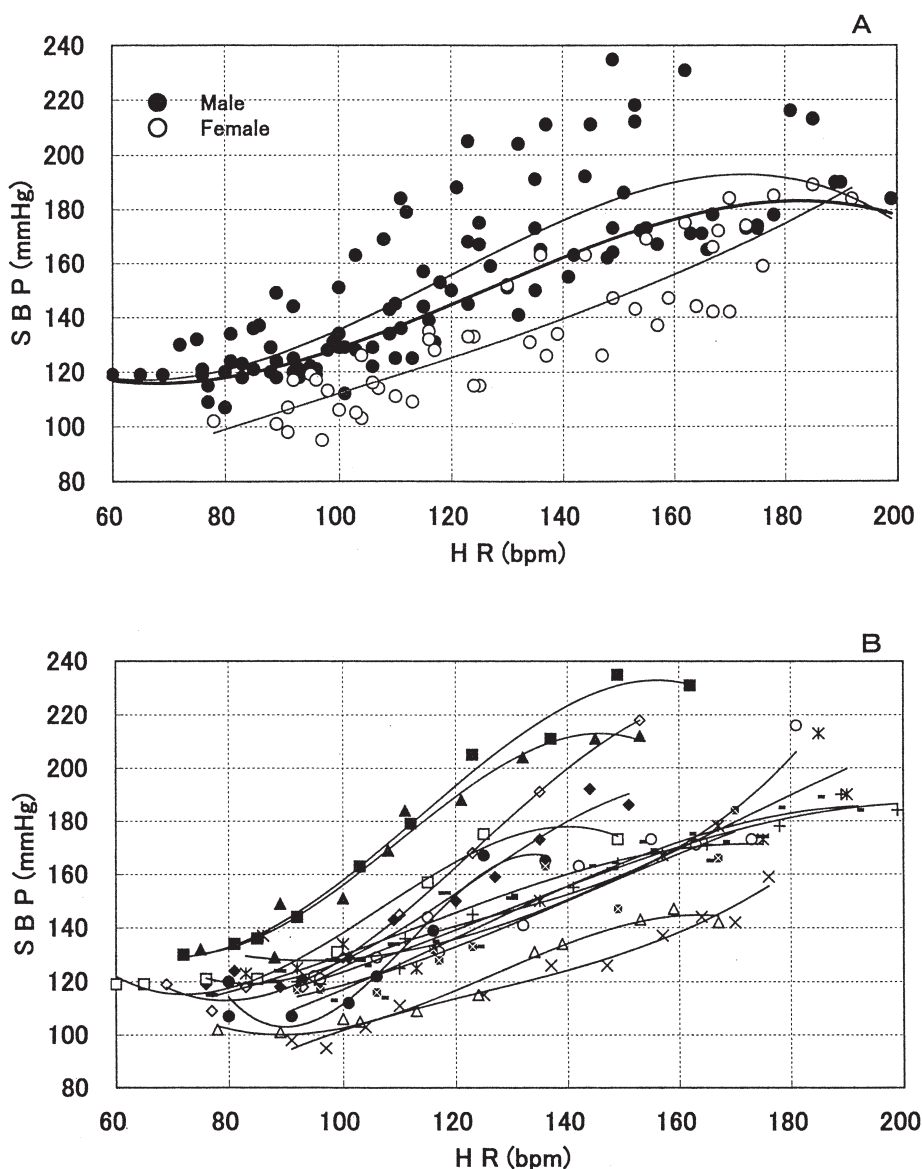


Fig. 1. A : Relationship between HR and SBP in all subjects ($n = 14$, $r = 0.74$, $p < 0.01$). ● male ($n = 10$, $r = 0.82$, $p < 0.01$) and ○ female ($n = 4$, $r = 0.89$, $p < 0.01$). The regression curves are drawn with third equation. B : Regression curves related to HR and SBP in each subjects. The regression curves are drawn with third equation.

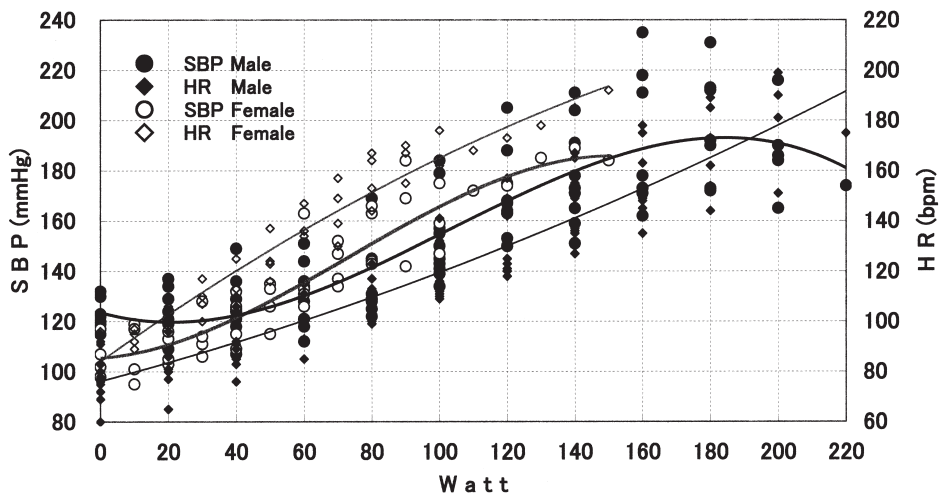


Fig. 2. Relationship between work load (Watt) and HR, SBP in male (n = 10, ◆ HR r = 0.93, p < 0.01, ● SBP r = 0.87, p < 0.01) and female subjects (n = 4, ◇ HR r = 0.97, p < 0.01, ○ SBP r = 0.92, p < 0.01). HR regression curves are drawn with second equation, SBP curves are drawn with third equation.

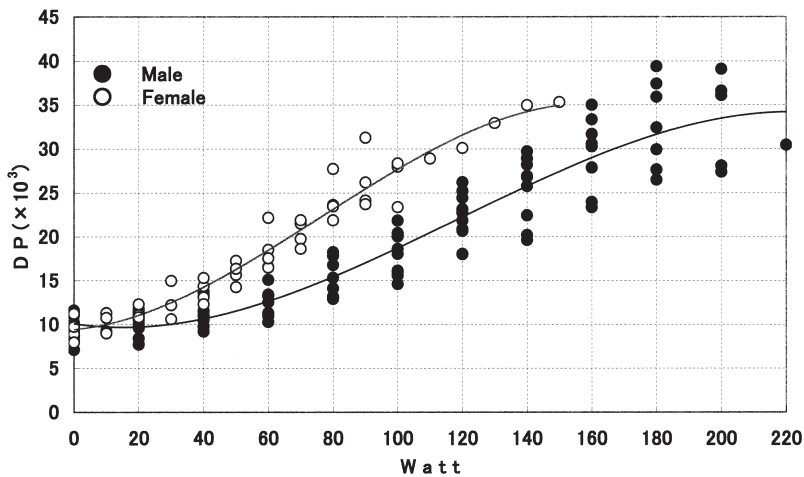


Fig. 3. Relationship between work load (Watt) and DP ($\times 10^3$) in ● male (n = 10, r = 0.94, p < 0.01) and ○ female subjects (n = 4, r = 0.97, p < 0.01). The regression curves are drawn with third equation.

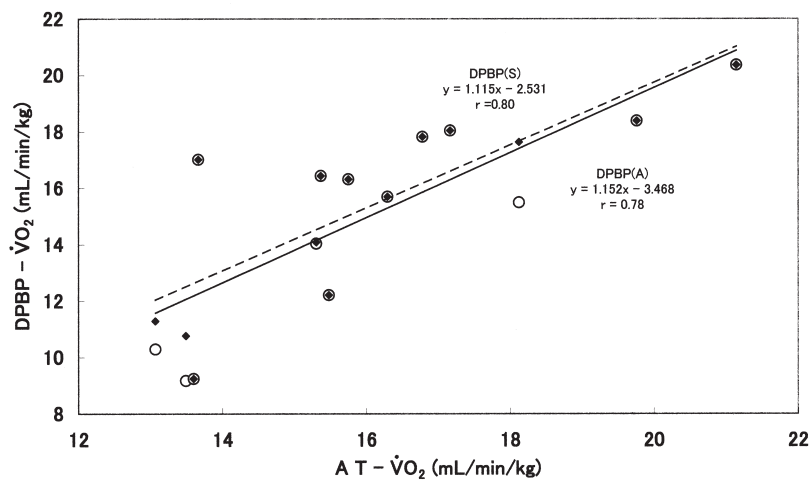


Fig. 4. Relationship between $\dot{V}O_2$ at AT and DPBP(A) (○) or DPBP(S) (◆). Solid line, regression line showing the relationship between $\dot{V}O_2$ at AT and DPBP(A); dotted line, regression line showing the relationship between $\dot{V}O_2$ at AT and DPBP(S).

3次回帰式におけるSBP第一、第二変異点の運動強度は25 Wattと180 Wattで、第二変異点直後のHRが175 bpmとなっていた。小原ら³⁾は、男子大学生に3分間隔の多段階負荷によるペダリング運動を実施し、圧受容器などによる血圧調整機構が働き出すポイントはHR175 bpm付近にあると報告している。負荷法が違う本研究においても同様の結果が得られたことから、HR175 bpm付近であることは支持できる。

女性では、明確なHRに対するSBPの上昇抑制を見出すことができなかった。また、負荷強度に対するSBPの上昇率ゼロとなる変異点は150 Wattとなったが、110 Watt以降は1名だけのデータであった。女性の心臓の大きさは男性に比べて身体の大きさの割に小さいため、一回拍出量 (SV) は男性より15%少なく、HRは10%多くなると言われている⁶⁾。図2に示すように、男性に比べて女性のHRが高いことから、運動時における女性の循環応答はHRを主に行っている可能性がある。今後、男女のHRとSBPの応答様式について詳しく調べる必要があると考える。

SBPが3次、HRは2次回帰式と仮定し、DPもSBPに近い曲線となると推定して3次回帰式として求めた。男性は180 Watt、女性は120 Wattで上昇抑制傾向がみられ、被験者ごとにみると、男性2名は160と180 Watt、女性2名は90と120 Wattで上昇抑制傾向がみられた。性別群および被験者ごとでみると上昇抑制傾向がみられたポイントは、運動負荷試験の経過時間でみると運動終了10から20%前に存在していた。抑制傾向がみられた4名では、DP上昇抑制データを除いて求めたDPBP比べてDP上昇抑制データも含めて求めたDPBPは低くなったが、ATに比べて両者ともに有意な差がみられなかった。この結果から、DPBP測定するときには必ず最大運動強度まで運動を課さない限り、DP上昇抑制を重要視する必要はないであろう。しかし、今回の被験者は健康な学生を対象にしており、壮年期以降の循環・呼吸器にリスクが生じやすい者や呼吸・循環器疾患患者のDP上昇抑制に関して検討する必要がある。

血圧は、心拍出量 (CO)、総末梢血管抵抗 (TPR)、血液量、血液の粘性、血管の硬さによって影響され、運動中の一過性の血圧変動は心拍出量と末梢血管抵抗が主に関与する。本研究での漸増運動負荷試験のSBP変動は、この2つの因子が変化したことによって生じていると推定している。運動時には、交感神経の緊張上昇や血中ノルアドレナリン濃度の上昇⁷⁾⁸⁾によって血管系に収縮が起こると考えられるが、実際には血液分配は調整され、TPRは運動強度の増大と共に減少し、血圧の過剰上昇を調節している。COはSVとHRの積で、

この2つの変化によって増減する。軽度から中等度の運動ではSV上昇要因が大きい、激しい運動になるとSVの上昇は限界に達し、もっぱらHRの上昇がCOの上昇に寄与することになる⁹⁾。全身血圧の調整はCOとTPRで行われていることから、久邇¹⁰⁾はSBPを $HR \times SV \times TPR$ と仮定し、DPBPの簡易測定法としてHR二乗法を紹介している。また、安永ら¹¹⁾は、DPBPとAT時の $\dot{V}O_2$ に大きな差がみられた被験者が存在すること、被験者のほとんどがDPBPと同時期にHRの屈曲点が存在することからDPBPはATを意味するよりSVがほぼ最大値に達したことを意味しているのではないかと述べている。

DPは心筋の酸素消費量と強い相関を示し¹²⁾、漸増する運動に対して指数関数的に上昇することから、運動中における心臓の負担度を間接的に推測する指標として利用されてきた。田中¹⁾²⁾らは、DPの上昇率が変化するポイントがLTと近似することに着目してDPBP法を開発し、その機序として血中乳酸値と交感神経活動の関係¹³⁾¹⁴⁾が心筋酸素消費量に反映されると報告している。さらに、心筋梗塞患者および高血圧患者にもDPBPが存在し、LTとの強い相関があることも報告している²⁾。これらの理由から、DPBP法やHR二乗法など循環指標を用いた方法でもAT、LTが推定されるのではないかと考えられる。また、AT、LT付近でSVが最大値に達するかは言及できないが、なんらかの関連性があると推測される。

DPの上昇抑制は、圧受容器の興奮が交感神経活動を抑制させて起こるSBPの上昇抑制が主な要因であると推測される。本研究では明らかにできなかったが、DPの上昇抑制が起こるとき、心筋の酸素消費量にどのような変化が生じているのか興味を持たれるところである。

VI まとめ

漸増運動負荷におけるSBPの応答が、二重積屈曲点 (DPBP) 検出に及ぼす影響について調べた。14名の学生 (男性10名、女性4名) を被験者とし、ランブ負荷によるペダリング運動を実施させた。

- 1) 男性のSBPは低圧と高圧に2点の変異点がみられる3次回帰式となった。変異点でのHRは65 bpmと175 bpmであった。しかし、女性にはSBPの変異点がみられなかった。
- 2) DPは男女とも3次回帰式に適合し、運動終了前に上昇抑制傾向がみられた。
- 3) DPの上昇抑制がみられても、DPBPとAT (V-slope法) には有意な相関関係がみられた。
- 4) SBP上昇の変異点がDPBP検出に及ぼす影響は少ないことが推察された。

文 献

- 1) Tanaka H., Shindo M. : The Benefits of the Low Intensity Training. *Ann Physiol. Anthropol.*, 11, 3, 365-368, 1992.
- 2) 田中宏暁, 清永 明, 鍵村昌範他 : 多段階運動負荷時の二重積の屈曲点と乳酸閾値の関係. *呼吸と循環*, 43, 5, 495-499, 1995.
- 3) 小原 繁, 林美代子, 荒木秀夫 : ペダリング運動における収縮期血圧の応答. *体力科学*, 46, 93-100, 1997.
- 4) Andersen P., Adams R. P., Sjogaard G., Thorboe A., and Saltin B. : Dynamic knee extension as model for study of isolated exercising muscle in humans. *J. Appl. Physiol.*, 59, 5, 1647-1653, 1985.
- 5) 森田啓之, 細見 弘 : 交感神経活動の調節機構と心臓血管中枢. *Cardiac Practice*, 4, 257-261, 1993.
- 6) 目崎 登 : 女性スポーツの医学. 文光堂, 1997.
- 7) 藤井宣晴, 鍋倉賢治, 権 五晟, 山崎文夫, 本間幸子, 池上晴夫 : 運動強度に対する心拍数および血漿カテコールアミンの応答. *体力科学*, 41, 313-321, 1992.
- 8) Saito M. and Nakamura Y. : Cardiac autonomic control and muscle exercise. *Jpn. J. Physiol.*, 45, 961-977, 1995.
- 9) 谷口興一 編 : 心肺運動負荷テスト - 呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方 - . 南江堂, 1993.
- 10) 久邇之房 : Ramp負荷時の (HR)²の変化と嫌気性代謝閾値との関係. 第6回臨床運動研究会, 大阪市立総合医療センター, 1997.
- 11) 安永 誠, 村岡康博 : DOUBLE PRODUCT BREAK POINT SYSTEMを利用した中高年齢者の体力評価について. *Res. Bull. Fukuoka Inst. Tech.*, 30, 1, 115-120, 1997.
- 12) Kitamura K., Jorgensen C. R., Gobel F. L., Taylor H. L., and Wang Y. : Hemodynamic correlates of myocardial oxygen consumption during upright exercise. *J. Appl. Physiol.*, 32, 516-522, 1972.
- 13) Lehmann M., Keul J., Da Prada H. : Plasma catecholamines in trained and untrained volunteers during graduated exercise. *Int. J. Sports Med.*, 2, 143-147, 1981.
- 14) Mazzeo RS., Marshall P. : Influence of plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise. *J. Appl. Physiol.*, 67, 1319-1322, 1989.

(受付 2001年10月26日)